

Скальський О. – гр. КТм-51

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНИХ  
МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ РОЗРОБЛЕНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ  
УСТАНОВКИ**

Науковий керівник к.т.н. доц. Золотий Р.З.

**АВТОРЕФЕРАТ**

Магістерської роботи

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Потреби сучасної промисловості ставлять першочергове завдання по створенню нових енерго- і матеріалозберігаючих технологій. Результати досліджень полімерних матеріалів, наповнених мінеральними дисперсіями різної фізичної природи дадуть змогу направлено регулювати експлуатаційні характеристики матеріалів призначених для антикорозійних покриттів деяких вузлів та поверхонь промислового обладнання. Явища, які зумовлюють перебіг фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз при формуванні композитів мають важливе значення при прогнозованому регулюванні фізико-механічних, теплофізичних, реологічних властивостей композитів, їх корозійної тривкості та зносостійкості.

Дослідження геометричних характеристик поверхневих шарів, що утворюються навколо дисперсних часток наповнювача, таких як густина і протяжність, а також динаміки їх формування при структуроутворенні матеріалів на межі поділу фаз “наповнювач – зв’язувач” є особливо актуальною проблемою, оскільки у більшості випадків властивості таких шарів визначають властивості матеріалу в цілому.

**Мета роботи:** дослідити структурні характеристики і геометричні розміри поверхневих шарів навколо дисперсних часток карбиду кремнію,

встановити закономірності їх формування залежно від вмісту, дисперсності і фізичної природи введеного у зв'язувач наповнювача та видати рекомендації щодо створення композитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**Недоліки відомих технологій:** не встановлено залежностей впливу кінетики формування мікроструктур матриці навколо часток наповнювача композитних матеріалів різної дисперсності.

**Завдання досліджень:**

1. Дослідити вплив на властивості епоксидних композитів у процесі їх формування структурних характеристик на межі поділу фаз внаслідок введення наповнювачів різної дисперсності.

2. Встановити залежності фізико-механічних характеристик епоксидних композитів для різних умов формування та дисперсності наповнювачів.

3. Видати рекомендації щодо створення на основі розроблених композитів захисних покриттів різного функціонального призначення.

**Об'єкт дослідження** – процеси формування модифікованих епоксидних композитів.

**Предмет дослідження** – Дослідження впливу дисперсних включень на фізико-механічні властивості композитних матеріалів на базі розробленої автоматизованої установки.

**Методи дослідження** – модифіковані методи дослідження топології дисперсних часток та зон міжфазної взаємодії навколо них; метод дослідження геометричних і структурних характеристик (площа поперечного перерізу, протяжність, ступінь зшивання, густина матеріалу) поверхневих шарів; використовували відомі методи дослідження фізико-механічних властивостей композитних матеріалів. Для реалізації поставлених завдань нами використано відомі методики вимірювання фізико-механічних властивостей композитів, які досліджували за стандартними методиками, а також розробленими у ТНТУ імені Івана Пулюя.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Досліджено геометричні розміри і структурні характеристики (площу поперечного перерізу, протяжність,

ступінь зшивання, густину) шарів на межі поділу фаз у композитних матеріалах з використанням диференціальних операторів у частинних похідних а також інтегральних операторів згортки на основі елементів теорії розпізнавання образів. Керуючи динамікою формування таких шарів при зшиванні композитів можна ціленаправлено регулювати експлуатаційні характеристики матеріалів. Наукові результати магістерської роботи співшукача є продовженням досліджень, викладених у роботі на здобуття ступеню бакалавра.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблені моделі формування шарів на межі поділу фаз в об'ємі наповненої матриці, що містить дисперсні частки наповнювача карбїду кремнію, які підтверджені експериментальними випробуваннями, дають можливість виділити і оцінити характеристики композитів.

2. Розроблена методика візуалізації поверхневих шарів та окреслення меж просторових кластерів на межі поділу фаз дисперсного наповнювача підтверджує результати експериментальних випробувань про виникнення шарів поділу фаз різної густини та протяжності, оптимальності якої можна добитись шляхом введення прогнозованої кількості наповнювача певної дисперсності.

3. Використання захисних покриттів особливо ефективно при захисті від корозії металоконструкцій і устаткування в умовах агресивних середовищ, а також від атмосферної корозії деталей та вузлів технологічного устаткування.

**Особистий внесок здобувача.** У магістерську роботу увійшли наукові результати, які здійснено за безпосередньої участі автора на всіх етапах роботи. Автором розроблено програмне забезпечення, підготування та виготовлення зразків, безпосередня участь у вимірюваннях, участь в обговоренні результатів та підготовка тексту публікацій.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати доповідалися на III міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів, «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль, 19-20 листопада 2014р.

**Публікації.** І.Г.Добротвор, О.Ю.Скальський Модель параметрів операторних перетворень оптичних характеристик структур епоксикомпозитів // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та

студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль, 19-20 листопада, 2014, - С.47-48.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріали викладено на 94 с. друкованого тексту, містить 15 ілюстрацій, 13 таблиць, список використаних джерел із 29 найменувань і додатків. Загальний обсяг роботи 114 с.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У ВСТУПІ** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету дослідження, висвітлено наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про особистий внесок здобувача.

**Перший розділ** присвячений огляду сучасних поглядів на вплив структурних параметрів олігомерів і наповнювачів на властивості композитів, які є типовими гетерогенними системами з вираженою межею поділу фаз. Сформульована мета і постановка завдань досліджень на основі аналізу науково-технічної проблеми створення полімерних композитів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

Наведено методики дослідження структури, фізико-механічних властивостей композитів. Проведено оцінку зернистості для параметрів та значень дискретної матричної функції, котра задає цифрове зображення досліджуваних участків тонких плівок епоксидних композитів. Просторову змінну при цьому міняли по прямих на зображенні зразка, що проходить по різних ділянках зв'язувача, дисперсних частках наповнювача, перетинаючи як зв'язувач так і проекції поверхневих шарів.

Розглянуто методи вирішення поставленої задачі. Методи дослідження – модифіковані методи аналізу топології дисперсних частинок; метод дослідження геометричних і структурних характеристик (площа поперечного перерізу, протяжність, ступінь зшивання, густина) міжфазних структур; використовували відомі методи дослідження фізико-механічних властивостей КМ, таких як руйнівне напруження і модуль пружності при згинанні, залишкові напруження, ударна в'язкість, здатність до повзучості, модуль повзучості а

також теплофізичних властивостей – теплостійкість. Використано відомі методики вимірювання фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, котрі досліджували за стандартними методиками, а також на автоматизованому пристрої для дослідження руйнівного напруження та модуля пружності при згинанні. Також досліджували структуру епоксидних композитів методами оптичної і електронної мікроскопії. Оптимізацію складу та технологічних режимів формування епоксикомпозитів проводили, використовуючи числові, аналітичні та статистичні методи.

Проведено аналіз методів та використовуваних операторів згладжування. Якщо зображення пошкоджене широкополосним сигналом завади (шуми датчика, передачі, квантування та ін.), виникають дрібноструктурні флуктуації яскравості, які, зазвичай, можуть бути усунуті за допомогою локальних операторів згладжування (низькочастотних фільтрів). Анізотропні періодичні перекручування в зображенні, навпаки, зазвичай усуваються в частотному просторі (наприклад, ліквідація 50-герцової перешкоди в зображенні здійснюється шляхом фільтрації складової 50 Гц зі спектра). Поряд з лінійним згладжуванням, що не забезпечує збереження контурів, а це є часто неприпустимо, застосовують й інші методи: нелінійні оператори згладжування (MINIMUM-, MEDIAN-, MAXIMUM-оператори); граничне згладжування; сигнально-адаптивні оператори згладжування; нагромадження зображень (усереднення декількох зображень); лінійну і нелінійну фільтрацію зображень у частотно-просторовій області.

Вказано, що коефіцієнт віконних функцій, що нормує, вибирається таким чином, щоб процедура заглушення шуму не викликала зміщення середньої інтенсивності обробленого зображення.

Розглянуто особливості деталізації операції підкреслення контурів та розпізнавання деталей низькочастотним оператором. Підкреслення і загострення контурів або збільшення різкості зображення відбувається внаслідок збільшення високочастотних складових сигналу, до яких відносяться не тільки компоненти контурів і меж, але і шум. Можливості реалізації цієї процедури за допомогою локальних фільтрів дуже різноманітні. Диференційний

оператор, записаний для цілей обробки зображень у дискретній формі, здійснює обчислення різниці яскравостей у межах вікна. У загальній формі диференційні оператори є лінійними.

Вказано і запропоновано доступні методи боротьби із зашумленням цифрових зображень, які використовували для ідентифікації об'єктів структур композитів на мікрорівні. Шуми можуть бути випадкові аналогові, імпульсні і детерміновані. Випадкові аналогові шуми виникають, як правило, через гранулярну структуру фотографічного матеріалу, на якому виготовлений оригінал. Для усунення таких шумів застосовуються методи фільтрації згладжування. Необхідно пам'ятати, що використання таких фільтрів може призводити до втрати різкості зображення, тому що усереднюється не тільки шумова структура, але і пікселі, що формують межу зображення. У деяких випадках доцільно після процедури згладжування додатково здійснювати процедуру нерізкого маскування. Під випадковими імпульсними шумами розуміють відносно рідко розташовані одиничні дефекти, типу подряпин, порошин. Стосовно до них процедура згладжування звичайно неефективна через те, що розміри таких дефектів достатньо великі. Для усунення таких дефектів застосовуються рангові фільтри. У такий спосіб можна усунути відносно дрібні дефекти типу подряпин і пилу.

Підсумовуючи дослідження у першому розділі, вказано, що встановлення на етапах технології формування композитів основних закономірностей впливу кінетики характеристик структури та геометричних параметрів зовнішніх поверхневих шарів, ґрунтовані на дослідженні зон міжфазної взаємодії, на поліпшення фізико-механічних властивостей композитів та розробити технології формування матеріалів та покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**У другому розділі** описано предмет та об'єкт дослідження. Вказано на необхідність врахування впливу структурних параметрів олігомерів пластифікаторів і наповнювачів на властивості композитів. Матеріали, які містять дисперсні мінеральні, або волокнисті наповнювачі є системами з вираженою межею поділу фаз. Створення нових матеріалів з широким

комплексом експлуатаційних характеристик не можливе без досліджень механізму проходження міжфазових явищ при структуроутворенні.

Обґрунтовано вибір зв'язувача та наповнювача композиту у даних дослідженнях.

Як зв'язувач для композитних матеріалів широко використовують епоксидні олігомери, які відповідають сукупності вимог до полімерної матриці. Найчастіше в промисловості використовують епоксидіанові смоли. Вони мають високу адгезійну та когезійну міцність завдяки значній кількості полярних функціональних груп, підвищену міцність при згинанні, стійкість до градієнта температурних навантажень. Висока хімічна тривкість і відносно низька проникність композитних матеріалів на основі епоксидних смол дозволяє експлуатувати їх в агресивних середовищах як покриття для захисту металевих деталей та вузлів механізмів та машин. Застосування композитних матеріалів на епоксидній основі дозволяє суттєво підвищити корозійну тривкість і стійкість до спрацювання деталей машин і механізмів. Як основу епоксидних композитів переважно застосовують низькомолекулярні олігомери ЕД-16 та ЕД-20. В якості твердників використовують такі, що дозволяють отримувати матеріали з меншою в'язкістю і високими діелектричними характеристиками. Для випадку холодного тверднення застосовують первинні аміни: ГМДА або ПЕПА.

Найчастіше для отримання наповнених матеріалів застосовують тверді наповнювачі – тонкодисперсні з зернистими частинками (карбід кремнію). Введення наповнювачів у полімерні матеріали зумовлює появу широкого спектру хімічної та фізичної взаємодії, яка виникає на межі поділу фаз "полімер-наповнювач". Вплив наповнювача на властивості полімера визначається: хімічною природою полімера та наповнювача, кількістю і розподілом активних центрів на поверхні частинок, питомою площею поверхні наповнювача, розміром і формою частинок, здатністю до утворення власних структур.

Для отримання композитних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками важливе значення має аналіз змін залишкових напружень в процесі формування матеріалу та їх релаксація. Відомо, що залишкові

напруження виникають внаслідок міжфазової взаємодії при утворенні фізичних і хімічних зв'язків між компонентами системи, а також внаслідок зменшення об'єму під час усадки. Наповнювачі при різному кількісному вмісті у зв'язувачі можуть по-різному впливати на структуру полімерів як у об'ємі, так і у поверхневих шарах. При цьому розглядають поняття „критичного” вмісту наповнювача у матриці – вмісту, при якому максимально зростають експлуатаційні характеристики композиту.

Проведений аналіз експериментальних результатів дослідження показує, що питання аналізу структурних параметрів і геометричних характеристик поверхневих шарів, тобто оцінювання їх товщини, протяжності, зміни конформаційного набору макромолекул на межі поділу фаз, залишаються відкритими. Очевидно, що подальше дослідження у цьому напрямку і аналіз проблеми має першочергове значення при створенні полімерних композитів з прогнозованими експлуатаційними характеристиками і дозволить комплексно поліпшити їх властивості внаслідок активації між фазової взаємодії і регулювання структурних процесів при формуванні композитних матеріалів.

**Третій розділ** присвячено характеристиці виробу та його призначення, аналіз умов роботи виробу, матеріалу і технології його формування.

На основі отриманих результатів дослідження, які подані у попередніх розділах, розроблено технологію формування композитних матеріалів і покриттів на їх основі, які відзначаються високими показниками експлуатаційних характеристик. Об'єкти для промислового впровадження вибрано на основі лабораторних і промислових досліджень розроблених технологій формування та нанесення покриттів із створених матеріалів в умовах впливу знакозмінних навантажень і значного градієнта зміни температур. Комплексні експериментальні дослідження і впровадження розроблених покриттів підтверджують доцільність і високу ефективність їх використання у різних галузях промисловості.

Керування механізмами хімічної та фізичної взаємодії на межі поділу фаз надає можливість регулювання параметрів структури зв'язувача і як наслідок – їхніми експлуатаційними характеристиками. Враховуючи весь спектр



проведених випробувань фізико-механічних, теплофізичних властивостей композитних матеріалів, а також аналізу результатів, дослідження геометричних розмірів та структурних параметрів зовнішніх поверхневих шарів у композитах і результати математичного моделювання процесу формування зон міжфазної взаємодії матеріалів, що містять волокнисті та дисперсні наповнювачі різної фізичної природи, розроблено технологію формування полімерних композитів та покриттів на їх основі.

Для підвищення антикорозійних характеристик покриттів запропоновано технологію формування та спосіб отримання покриття. Приведено порівняння основних характеристик виробу (покриття) із основними відомими світовими і вітчизняними аналогами.

**Четвертий розділ.** Проведено порівняльний аналіз ступеня зшивання матриці у поверхневих шарах на основі розробленої методики. Показано, що поверхневі шари найбільшого розміру утворюються у композитних матеріалів, наповнених феритом. які, водночас, характеризуються незначними значеннями внутрішніх напружень в усьому досліджуваному діапазоні товщини покриттів. Це явище пояснюється впливом не скомпенсованого магнітного моменту феромагнітних частинок на полімерну матрицю, який забезпечує перерозподіл глобулярних конформацій епоксидного олігомера. З метою підтвердження отриманих результатів досліджено вплив товщини покриттів на внутрішні напруження у матеріалі. Встановлено оптимальну товщину покриттів ( $h = 0,8 \dots 1,0$  мм), що мають незначні внутрішні напруження.

Пропонується технологічна схема виробництва композиційного матеріалу із дисперсним наповнювачем, яка складається із 3 ділянок. Кожна із ділянок взаємозв'язана послідовно із іншою з метою покращення якості композитів. Проведено порівняльний аналіз ступеня зшивання матриці у поверхневих шарах на основі розробленої методики. Представлена розробка технології суміщення компонентів у композиті для їх реалізації у промисловому виробництві з необхідністю є важливою для розширення масштабів впровадження на підприємствах різних галузей промисловості України.

**У п'ятому розділі** наведено алгоритм проведення розрахунку та вихідні дані для проведення розрахунку відсоткового об'єму поверхневих шарів у композиті із дисперсним наповненням карбід кремнію різної дисперсності.

Із допомогою алгоритмів та операторів програми Маткад – 14 визначено допустимі межі поверхневих шарів, проведено інтерполяцію їх об'єму відносно об'єму композиту. Побудовано графічні багатомірні залежності між наповненням композиту та залишкованими напруженнями, відстанню між частками і густиною поверхневих шарів для різних дисперсностей часток карбіду кремнію.

**Шостий розділ** присв'ячено обґрунтуванню економічної ефективності технології виробництва композитів із дисперсним наповненням.

Критерієм народногосподарської економічної ефективності являється економія затрат суспільної праці, що рівноцінно росту ефективності всієї узагальнюючої праці. Водночас з критеріями важливо правильно визначити показники економічної ефективності нової техніки. Економічна ефективність нової техніки оцінюється за допомогою вартості і натуральних показників. До вартісних показників відносяться капітальні вкладення, рентабельність виготовлення, економія приведених затрат.

Проведено розрахунок затрат на виготовлення установки покриттів композиційними матеріалами поверхонь устаткування різного призначення. Визначено затрати на сировину і матеріали розраховуються на основі норм їх витрат і відповідних оптових цін, затрати енергії на технологічні цілі, затрати на основну заробітну плату виробничих робітників, що зайняті у виготовленні установки, визначаються на основі даних про трудомісткість виготовлення всіх деталей по видах робіт, величину тарифних ставок відповідних розрядів та процент доплат, що входять до основної зарплати робітників, витрати на проектування, розробку техпроцесу, проектування інструменту і технологічної оснастки.

**У додатках** наведено алгоритми, методики дослідження фізико – механічних властивостей та експлуатаційних характеристик композитних

матеріалів, схеми розроблених установок. Наведено документи, що підтверджують промислове впровадження результатів досліджень.

## **ВИСНОВКИ І ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

Встановлення характеристик тополого-геометричних та фізико-механічних властивостей шарів, які виникають на межі поділу фаз олігомер – наповнювач в процесі тверднення композитів, створення кінетичних моделей формування мікроструктур наповнених епоксикомпозитів, вплив на кінетику тверднення таких факторів як природа епоксидного олігомеру, твердника, дисперсного, волокнистого наповнювачів різної фізико-хімічної природи а також їх композицій дозволило у роботі розв'язати проблему створення епоксикомпозитів із прогнозованими експлуатаційними властивостями. В результаті виконання роботи отримано слідуючі основні результати:

1. Розроблено модель формування поверхневих шарів дисперсних часток в об'ємі матриці наповненого епоксикомпозиту.

2. Розроблено методику візуалізації поверхневих шарів та окреслення меж просторових кластерів поверхневих шарів дисперсного наповнювача. В результаті експериментальних випробувань встановлено, що збільшення розмірів поверхневих шарів, а також ступеня зшивання у них приводить до збільшення когезійної міцності епоксикомпозитів.

3. Отримано математичну модель ресурсообміну в процесі тверднення епоксикомпозиту, що спричиняє характер динаміки поверхневих шарів навколо дисперсних часток наповнювача в об'ємі матриці композиту.

4. Впровадженням на контрольних об'єктах встановлено, що використання захисних покриттів особливо ефективно при захисті від корозії металоконструкцій і устаткування в умовах агресивних середовищ, а також від атмосферної корозії деталей та вузлів технологічного устаткування.

5. На основі отриманих результатів дослідження розроблено нові епоксикомпозитні матеріали і захисні покриття на їх основі з високими експлуатаційними характеристиками.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ**

1. Добротвор І.Г., Скальський О.Ю. МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ. // Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» –Тернопіль 2014